

**PCT**

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales Büro



INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

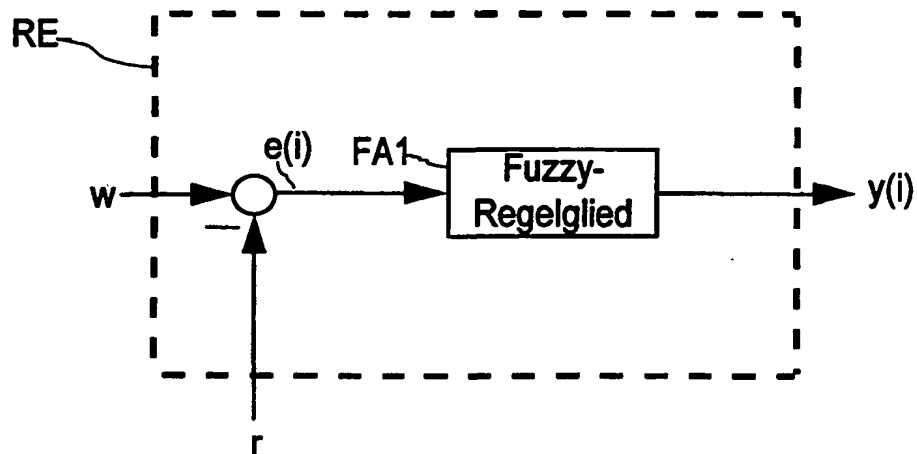
(51) Internationale Patentklassifikation <sup>6</sup> : <b>G05B 19/00</b>	<b>A2</b>	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: <b>WO 99/08163</b> (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 18. Februar 1999 (18.02.99)
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE98/02163</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 29. Juli 1998 (29.07.98)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: 197 34 711.8 11. August 1997 (11.08.97) DE</p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, D-80333 München (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): ADAMY, Jürgen [DE/DE]; Birkenweg 1, D-91338 Igendorf (DE). YOUSIF, Amin [DE/DE]; Entenmoorweg 40, D-27578 Bremerhaven (DE).</p>		<p>(81) Bestimmungsstaaten: US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Veröffentlicht <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i></p>

(54) Title: CONTROL UNIT COMPRISING DYNAMIC FUZZY LOGIC CONTROL ELEMENTS, TEMPORALLY DISCRETE

(54) Bezeichnung: REGLER MIT ZEITDISKRETEN, DYNAMISCHEN FUZZY-REGELGLIEDERN

(57) Abstract

The invention concerns a control unit (RE) having at least one control element (FA1...FA8), with in particular at least one integrating (FA6, FA8) and/or differentiating (FA7) transfer characteristic. Said control element (FA1...FA8) is designed in the form of a control element with dynamic fuzzy logic, temporally discrete (FAx). This type of dynamic fuzzy logic control element (FAx) consists for example of a fuzzy logic automaton with processing states ( $Z_m'...Z_n$ ). Advantageously, the control unit can be made up of control elements having each systematically dynamic fuzzy logic properties wherein targeted non-linearity can be input to obtain the desired control characteristics.



FA1...FUZZY LOGIC CONTROL ELEMENT

### (57) Zusammenfassung

Der erfindungsgemäße Regler (RE) weist wenigstens ein Regelglied (FA1..FA8), insbesondere mit zumindest einer integrierenden (FA6, FA8) und/oder differenzierenden (FA7) Übertragungscharakteristik auf, welches als ein zeitdiskretes, dynamisches Fuzzy-Regelglied (FAx) aufgebaut ist. Ein derartiges zeitdiskretes, dynamisches Fuzzy-Regelglied (FAx) ist beispielsweise ein sogenannter Fuzzy-Automat, welcher Bearbeitungszustände (Zm'..Zn) aufweist. Vorteilhaft ist es, daß der erfindungsgemäße Regler mit Regelgliedern aufbaubar ist, welche jeweils systematisch dynamische Fuzzy-Eigenschaften aufweisen und bei welchen gezielt Nichtlinearitäten für ein gewünschtes Regelverhalten einbringbar sind.

### LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

## Beschreibung

Regler mit zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelgliedern

- 5 In herkömmlichen Reglern als Regelglied eingesetzte Fuzzy-Systeme sind statische Systeme und verfügen als solche nicht über dynamische Übertragungseigenschaften. Sie weisen deshalb die Eigenschaften von nichtlinearen, statischen Übertragungs-
- 10 gliedern auf.
- Um dynamische Regeleigenschaften eines Fuzzy-Reglers zu realisieren, ist es bekannt, statische Fuzzy-Systeme mit herkömmlichen, linearen Dynamik-Regelgliedern zu kombinieren. Derartige lineare Dynamik-Regelglieder weisen insbesondere
- 15 eine integrierende, differenzierende oder proportionale Übertragungscharakteristik oder auch beliebige Kombinationen davon auf. Beispielsweise werden derartige lineare Dynamik-Regelglieder auch als sogenannte I-, D-, P-, PI-, PD- oder PID-Regelglieder bezeichnet.
- 20 Wie in den Figuren 1 und 2 dargestellt, ist es bekannt, bei einem Regler RE' lineare Dynamik-Regelglieder mit einer integrierenden, differenzierenden und/oder proportionalen Übertragungscharakteristik entweder vor, wie in der Figur 1 dargestellt ist, oder auch einem statischen Fuzzy-System-Regel-
- 25 glied FU nachzuschalten, wie in der Figur 2 dargestellt. In den Figuren 1 und 2 sind jeweils beispielhaft ein lineares Dynamik-Regelglied R1' mit proportionaler, ein lineares Dynamik-Regelglied R2' mit integrierender und ein lineares Dynamik-Regelglied R3' mit differenzierender Übertragungscharakteristik dargestellt. Die in den Figuren 1 und 2 dargestellten, bekannten Regler RE' mit Fuzzy-Eigenschaften weisen
- 30 durch die linearen Dynamik-Regelglieder R1' bis R3' insbesondere die dynamischen Eigenschaften eines sogenannten PID-Reg-
- 35 lers auf.

Aus Koch, Mario u. a. Fuzzy-Control, R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1996, Seiten 29-32 und 249-266 ist es bekannt, zur Erzeugung dynamischer Übertragungseigenschaften, einem Regler mit integrierenden und/oder differenzierenden Übertragungseigenschaften ein Fuzzy-System vor-oder nachzuschalten.

Die in den Figuren 1 und 2 beispielhaft dargestellten, bekannten Regler RE' weisen in der Regel eine Führungsgröße w', insbesondere zur Vorgabe eines Regelsollwertes und eine Rückführgröße r' auf. Die Rückführgröße r' wird dabei im Regler RE' von der Führungsgröße w' subtrahiert und als Regeldifferenz  $e' = w' - r'$  den Regelgliedern R1' bis R3' bzw. dem Fuzzy-System-Regelglied FU zugeführt. Deren Ausgangsgrößen, d.h. der Regelglieder R1' bis R3' bzw. des Fuzzy-System-Regelglieds FU, sind im Regler RE' zusammengeführt und dienen als Ausgangsgröße y' des Reglers RE' insbesondere zur Regelung eines technischen Prozesses, von dem die Rückführgröße r' insbesondere als sogenannter Regelistwert zurück zum Regler RE' geführt ist.

20

Nachteilig ist es, daß den herkömmlichen Reglern mit Fuzzy-Eigenschaften die Kombination von zwei unterschiedlichen Systemen, nämlich statischen Fuzzy-Systemen mit linearen Dynamik-Regelglieder-Systemen zugrunde liegt. Besonders nachteilig ist es, daß das gezielte Einbringen von Nichtlinearitäten gar nicht oder nicht ohne erheblichen Aufwand möglich ist, da insbesondere Kenntnisse der Kennfeldregelung oder sonstige Zusatzkenntnisse erforderlich sind. Die Beeinflussung und Modifizierung der Regeleigenschaften ist dadurch sehr aufwendig oder überhaupt nicht realisierbar. Des weiteren sind hiermit bestimmte, in der Regelungstechnik erwünschte Reglereigenschaften nicht realisierbar, wie insbesondere eine nichtlineare, begrenzte Integrations-Regelcharakteristik, wie beispielsweise die sogenannte 'Anti-Wind-Up'-Regelcharakteristik.

Aus dem Dokument WO 96/31304 und aus 'Breakout Prediction for Continuous Casting by Fuzzy Mealy Automata', Proceedings of the 3rd European Congress of Intelligent Techniques and Soft Computing EUFIT, Aachen, 29.-31 August 1995, Seiten 754 bis 759, J. Adamy, ist ein als Fuzzy-Automat bezeichnetes, dynamische Fuzzy-System zur Durchbruch-Früherkennung beim Stranggießen bekannt.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen Regler mit Fuzzy-Eigenschaften so zu verbessern, daß die Regelvorgänge, insbesondere die Integrations- und Differentiationsvorgänge, einfacher beeinflussbar und modifizierbar sind.

Die Aufgabe wird gelöst mit dem im Anspruch 1 angegebenen, erfindungsgemäßen Regler.

Vorteil des erfindungsgemäßen Reglers ist es, daß die Eigenschaften statischer Fuzzy-Systeme und herkömmlicher, linearer dynamischer Regelglieder in Form von zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelgliedern zusammengeführt sind. Der Regler ist somit vorteilhaft ausschließlich mit Regelgliedern aufbaubar, welche jeweils systematisch dynamische Fuzzy-Eigenschaften aufweisen.

Des weiteren vorteilhaft ist es, daß der erfindungsgemäße Regler vollständig mit Standard Fuzzy-Reglersoftware programmierbar und parametrierbar ist. Beispielsweise ist der erfindungsgemäße Regler somit vorteilhaft in Software- und/oder Hardwareform realisierbar.

Besonders vorteilhaft ist es, daß die Übertragungseigenschaften der Fuzzy-Regelglieder gezielt und anschaulich modifizierbar sind. Ausgehend von Fuzzy-Regelgliedern mit einer zunächst insbesondere annähernd linearen Reglercharakteristik sind vorteilhaft gezielt gewünschte Regler-Nichtlinearitäten einbringbar. Beispielsweise ist in dem erfindungsgemäßen Regler auf einfachste Weise eine bestimmte Reglercharakteristik

implementierbar, welche insbesondere durch in den Fuzzy-Regelgliedern vorliegende linguistische Regeln, d.h. der Fuzzy-Regeln der Fuzzy-Folgerungen gezielt definierbar, also 'designbar' ist.

5

Vorteilhaft liegen die zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieder des erfindungsgemäßen Reglers insbesondere in Form sogenannter Fuzzy-Automaten vor. Diese weisen innere Zustandsgrößen auf, welche auf Grund von Fuzzy-Folgerungen aktualisiert werden. Die Ausgangsgröße wird ebenfalls auf Grund von Fuzzy-Folgerungen derartig erzeugt, daß das Fuzzy-Regelglied die vorgesehene Übertragungscharakteristik, insbesondere zumindest eine integrierende und/oder eine differenzierende Übertragungscharakteristik aufweist.

15

Ein weiterer Vorteil ist es, daß innere Zustandsgrößen der Fuzzy-Regelglieder des erfindungsgemäßen Reglers insbesondere durch eine Folge von inneren Bearbeitungszuständen gebildet werden, wobei das Fuzzy-Regelglied bei einer Aktualisierung der inneren Zustandsgröße von einem bisherigen Bearbeitungszustand zeitdiskret in einen folgenden Bearbeitungszustand übergeht. Die Zustandsgrößen sind vorteilhaft mittels eines Zustandsgraphen graphisch anschaulich darstellbar.

20

Vorteilhaft dient der erfindungsgemäße Regler zur Regelung eines technischen Prozesses.

25

Weitere vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind in den entsprechenden Unteransprüchen angegeben.

30

Die Erfindung wird des weiteren anhand der in den nachfolgend kurz angeführten und teilweise bereits oben erläuterten Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele weiter erläutert. Dabei zeigt beispielhaft:

FIG 1 einen bekannten Regler mit Fuzzy-Eigenschaften, welcher ein herkömmliches statisches Fuzzy-System auf-

35

weist, welchem drei lineare Dynamik-Regelglieder mit einer integrierenden, differenzierenden bzw. proportionalen Übertragungscharakteristik vorgeschaltet sind,

- 5    FIG 2    eine Ausführungsform des bekannten und bereits in der Figur 1 dargestellten Reglers mit dem herkömmlichen statischen Fuzzy-System nachgeschalteten linearen Dynamik-Regelgliedern,
- 10    FIG 3    einen erfindungsgemäßen Regler mit einem zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglied,
- FIG 4    einen erfindungsgemäßen Regler mit drei parallel geschalteten zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelgliedern,
- 15    FIG 5    eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reglers gemäß der Figur 4, wobei ein sogenannter PID-Regler gebildet wird, welcher eine integrierend-differenzierend-proportionale Übertragungscharakteristik aufweist,
- 20    FIG 6    eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reglers gemäß der Figur 5, wobei die Fuzzy-Regelglieder mit integrierender und differenzierender Übertragungscharakteristik in einem Fuzzy-Regelglied zusammengefaßt sind,
- 25    FIG 7a    die innere Struktur einer allgemeinen Ausführungsform eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds, welches eine erste und zweite statische Fuzzyeinrichtung und eine Speichereinrichtung für die innere Zustandsgröße aufweist,
- 30    FIG 7b    die innere Struktur einer bevorzugten Ausführungsform der ersten statischen Fuzzyeinrichtung eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds,

- FIG 7c die innere Struktur einer bevorzugten Ausführungsform der zweiten statischen Fuzzyeinrichtung eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds,
- 5      FIG 8 einen Zustandsgraphen eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds mit integrierender Übertragungscharakteristik,
- FIG 9 einen Zustandsgraphen eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds mit differenzierender Übertragungscharakteristik,
- 10    FIG 10 ein beispielhaftes Diagramm zur Darstellung der Eingangs- und Ausgangsgröße des in der Figur 8 dargestellten zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds mit integrierender Übertragungscharakteristik für den Spezialfall einer linear ausgelegten Übertragungscharakteristik,
- 15
- FIG 11 ein beispielhaftes Diagramm zur Darstellung der Eingangs- und Ausgangsgröße des in der Figur 9 dargestellten zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds mit differenzierender Übertragungscharakteristik für den Spezialfall einer linear ausgelegten Übertragungscharakteristik,,
- 20
- FIG 12a einen Zustandsgraphen eines ersten zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds mit integrierender Übertragungscharakteristik, welches durch gezieltes Einbringen von Nichtlinearitäten als sogenanntes 'Anti-Wind-Up'-Regelglied modifiziert ist,
- 25
- FIG 12b einen Zustandsgraphen eines ersten, als sogenanntes 'Anti-Wind-Up'-Regelglied modifizierten Fuzzy-Regelglieds, und
- 30    FIG 13 einen Zustandsgraphen eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds mit differenzierender Übertragungscharakteristik, wobei im Bearbeitungszustand



Z kleine Eingabegrößen nicht auf die Ausgangsgröße wirken.

In der Figur 3 ist beispielhaft die Struktur eines erfindungsgemäßen Reglers RE mit wenigstens einem Regelglied FA1 dargestellt. Das Regelglied FA1 weist insbesondere zumindest eine integrierende und/oder differenzierende Übertragungscharakteristik auf. Gemäß der Erfindung ist das Regelglied FA1 als ein zeitdiskretes, dynamisches Fuzzy-Regelglied aufgebaut. Der erfindungsgemäße Regler RE ist dabei nicht auf ein einziges zeitdiskretes, dynamisches Fuzzy-Regelglied beschränkt, sondern kann auch beliebige Verschaltungen von mehreren Fuzzy-Regelgliedern aufweisen. Insbesondere kann der erfindungsgemäße Regler RE auch zusätzlich eine Kombination von zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelgliedern mit herkömmlichen, linearen Dynamik-Regelgliedern aufweisen.

Wie in der Figur 4 dargestellt ist, weist der erfindungsgemäße Regler RE insbesondere auch mehrere zeitdiskrete, dynamische Fuzzy-Regelglieder auf, beispielsweise drei parallel angeordnete zeitdiskrete, dynamische Fuzzy-Regelglieder FA2, FA3 und FA4. Vorteilhaft ist die Gesamt-Übertragungscharakteristik auf die einzelnen Fuzzy-Regelglieder FA2 bis FA4 aufgeteilt, wobei jedes Fuzzy-Regelglied FA2 bis FA4 eine bestimmte Komponente der Gesamt-Übertragungscharakteristik bewirkt.

In Figur 5 ist eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Reglers RE dargestellt, welcher beispielsweise durch die drei parallel angeordneten zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieder FA5, FA6 und FA7 eine integrierend-differenzierend-proportionale Übertragungscharakteristik aufweist. Dabei weist beispielsweise das Fuzzy-Regelglied FA5 ein proportionales, das Fuzzy-Regelglied FA6 eine integrierende und das Fuzzy-Regelglied FA7 eine differenzierende Übertragungscharakteristik auf. Der in Figur 5 dargestellte

Regler RE entspricht somit einem sogenannten PID-Regler mit Fuzzy-Eigenschaften.

In der Figur 6 ist des weiteren beispielhaft ein erfindungsgemäßer Regler RE mit einem zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglied FA8 dargestellt, welches eine integrierend-proportionale Übertragungscharakteristik aufweist. Der in Figur 6 dargestellte Regler RE entspricht somit einem sogenannten PI-Regler mit Fuzzy-Eigenschaften.

Dem in den Figuren 3 bis 6 dargestellten erfindungsgemäßen Regler RE mit dessen beispielhaft aufgeführten Ausführungsformen sind insbesondere eine auch als Regelsollwert bezeichnete Führungsgröße  $w$  und eine insbesondere auch als Regelwert bezeichnete Rückführgröße  $r$  zugeführt. Die aus Führungsgröße  $w$  und Rückführgröße  $r$  gebildete Regeldifferenz ist den zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelgliedern FA1, FA2 bis FA4, FA5 bis FA7, bzw. FA8 als Eingangsgröße  $e(i) = w - r$  zugeführt. Die Ausgänge der jeweiligen Fuzzy-Regelglieder FA1, FA2 bis FA4, FA5 bis FA7, bzw. FA8 sind insbesondere im Regler RE zur Ausgangsgröße  $y(i)$  zusammengeführt, beispielsweise durch eine direkte Addition oder eine gewichtete Addition.

In Figur 7a ist beispielhaft die innere Struktur eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds FAX dargestellt, welches eine allgemeine Ausführungsform der in den Figuren 3 bis 6 dargestellten Fuzzy-Regelglieder FA1, FA2 bis FA4, FA5 bis FA7 und FA8 beschreibt. Das Fuzzy-Regelglied FAX weist dabei mit Bezug auf die Figuren 3 bis 6 die Eingangsgröße  $e(i)$  und die Ausgangsgröße  $y(i)$  auf. Eingangs- und Ausgangsgröße  $e(i)$  bzw.  $y(i)$  können insbesondere Vektorgrößen sein, d.h. Eingangs- und Ausgangsgröße  $e(i)$  bzw.  $y(i)$  können auch in Form mehrerer Eingangs- bzw. Ausgangswerte vorliegen. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung aktualisiert das Fuzzy-Regelglied aus der Eingangsgröße  $e(i)$  und aus einer inneren Zustandsgröße  $z(i)$  auf der Grundlage von Fuzzy-

Folgerungen die innere Zustandsgröße  $z(i)$  derartig, daß das Fuzzy-Regelglied FAX zumindest eine integrierende und/oder eine differenzierende, insbesondere nichtlineare Übertragungsscharakteristik aufweist. Die aktuelle Zustandsgröße  $z(i)$  kann insbesondere eine Vektorgröße sein.

Zur Aktualisierung der inneren Zustandsgröße  $z(i)$  des Fuzzy-Regelglieds FAX auf der Grundlage von Fuzzy-Folgerungen weist das Fuzzy-Regelglied FAX des erfindungsgemäßen Reglers RE bevorzugt wenigstens eine erste statische Fuzzyeinrichtung  $F(z(i), e(i))$  auf. Diese erzeugt aus der Eingangsgröße  $e(i)$  und der aktuellen inneren Zustandsgröße  $z(i)$  die der zeitlich auf diese folgende, innere Zustandsgröße  $z(i+1)$ . Zeitdiskret geht das Fuzzy-Regelglied FAX von der aktuellen inneren Zustandsgröße  $z(i)$  in die folgende, innere Zustandsgröße  $z(i+1)$  über. Beispielsweise liegt eine durch ein Taktsignal vorgegebenen Taktrate vor, mit der das Fuzzy-Regelglied FAX die innere Zustandsgröße  $z(i)$  aktualisiert.

Des weiteren weist das Fuzzy-Regelglied FAX zusätzlich bevorzugt wenigstens eine zweite statische Fuzzyeinrichtung  $G(z(i), e(i))$  auf, um die Ausgangsgröße  $y(i)$  des Fuzzy-Regelglieds FAX auf der Grundlage von Fuzzy-Folgerung zu erzeugen. Diese erzeugt aus der Eingangsgröße  $e(i)$  und der aktuellen inneren Zustandsgröße  $z(i)$  die aktuelle Ausgangsgröße  $y(i)$ . Sind die erste und zweite Fuzzyeinrichtung  $F(z(i), e(i))$  bzw.  $G(z(i), e(i))$  funktionsgleich, beispielsweise soll die innere Zustandsgröße  $z(i)$  den gleichen Wert aufweisen wie die Ausgangsgröße  $y(i)$ , so ist die zweite Fuzzyeinrichtung  $G(z(i), e(i))$  nicht erforderlich.

Insbesondere weist das in Figur 7a dargestellte Fuzzy-Regelglied FAX eine Speichereinrichtung MZ zur Zwischenspeicherung der aktuellen inneren Zustandsgröße  $z(i)$  auf. Durch die Speichereinrichtung MZ wird die aktuelle innere Zustandsgröße  $z(i)$  gespeichert und zeitdiskret die von der ersten stati-

schen Fuzzzeinrichtung  $F(z(i), e(i))$  erzeugte folgende, innere Zustandsgröße  $z(i+1)$  übernommen.

In den Figuren 7b und 7c ist beispielhaft die erste statische Fuzzzeinrichtung  $F(z(i), e(i))$  bzw. die zweite statische Fuzzzeinrichtung  $G(z(i), e(i))$  dargestellt. Die statischen Fuzzzeinrichtungen  $F(z(i), e(i))$  und  $G(z(i), e(i))$  werden insbesondere deshalb als statisch bezeichnet, weil zeitältere Werte nicht bei der Erzeugung von neuen Werten berücksichtigt werden. Über eine der ersten und zweiten Fuzzzeinrichtung  $F(z(i), e(i))$  bzw.  $G(z(i), e(i))$  in der Regel zugrunde liegende Fuzzifizierungseinheit  $F1$  bzw.  $F2$ , eine Inferenzeinheit  $I1$  bzw.  $I2$  und eine Defuzzifizierungseinheit  $D1$  bzw.  $D2$  werden auf der Grundlage von Fuzzy-Folgerungen die folgende, innere Zustandsgröße  $z(i+1)$  bzw. die Ausgangsgröße  $y(i)$  erzeugt.

Durch die zeitdiskrete Übernahme der folgenden, inneren Zustandsgröße  $z(i+1)$  beispielsweise durch die Speichereinrichtung  $MZ$  des dynamischen Fuzzy-Regelglieds  $FAX$ , wird der ersten und zweiten statischen Fuzzzeinrichtung  $F(z(i), e(i))$  bzw.  $G(z(i), e(i))$  die neue innere Zustandsgröße  $z(i+1)$  als die nunmehr aktuelle, innere Zustandsgröße  $z(i)$  zugeführt. Ein derartig aufgebautes Fuzzy-Regelglied  $FAX$  wird insbesondere als Fuzzy-Automat bezeichnet.

25

In den Figuren 8 und 9 sind zwei zeitdiskrete, dynamische Fuzzy-Regelglieder  $FAX$  beispielhaft anhand von durch die entsprechende Zustandsgröße  $z(i)$  einnehmbaren Bearbeitungszuständen  $Zm'$  bis  $Zn$  beschrieben. Diese weitere Ausführungsform der Erfindung ist anhand von Zustandsgraphen des zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds  $FAX$  dargestellt. Der in der Figur 8 dargestellte Zustandsgraph beschreibt ein Fuzzy-Regelglied  $FAX$  mit einer integrierenden Übertragungscharakteristik und der in der Figur 9 dargestellte Zustandsgraph beschreibt ein Fuzzy-Regelglied  $FAX$  mit einer differenzierenden Übertragungscharakteristik. Dabei wird gemäß der vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung die innere Zustandsgröße

30  
35

z(i) des Fuzzy-Regelglieds FAX durch wenigstens eine Folge von Bearbeitungszuständen  $Z_m'$  bis  $Z_1'$ ,  $Z_0$ ,  $Z_1$  bis  $Z_n$  gebildet, wobei das Fuzzy-Regelglied FAX bei einer Aktualisierung der inneren Zustandsgröße z(i) auf der Grundlage von Fuzzy-Folgerungen von einem bisherigen Bearbeitungszustand zeitdiskret in einen folgenden Bearbeitungszustand übergeht.

Die in den Figuren 8 und 9 aufgeführten Beispiele bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung sind beispielhaft auf die jeweils fünf fettgedruckt dargestellten Bearbeitungszustände  $Z_2'$  bis  $Z_2$  beschränkt. Die Anzahl der Bearbeitungszustände ist selbstverständlich nicht auf die in den aufgeführten Beispielen beschränkt, sondern ist in beide Richtungen beliebig erweiterbar, wie beispielhaft durch die gestrichelten Bearbeitungszustände  $Z_m'$  und  $Z_n'$  angedeutet dargestellt ist.

Jedem der Bearbeitungszustände  $Z_2'$  bis  $Z_2$  ist eine bestimmte Wertigkeit zugeordnet, beispielsweise NM für mittlere negative Werte, NS für kleine negative Werte, Z für Werte, welche annähernd die Größe Null aufweisen, PS für kleine positive Werte oder PM für mittlere positive Werte. Die Pfeile in den Zustandsgraphen geben den Wechsel von einem aktuellen Bearbeitungszustand des Fuzzy-Regelglieds FAX in einen folgenden Bearbeitungszustand an. Den Pfeilen sind Bezugszeichen zugeordnet, welche die Eingangsgröße e(i) und die Ausgangsgröße y(i) angeben. Die Wertigkeiten der Bearbeitungszustände  $Z_2'$  bis  $Z_2$  dienen dabei insbesondere auch als Fuzzy-Werte für die Eingangs- und Ausgangsgröße e(i) bzw. y(i) des Fuzzy-Regelglieds FAX. Die Bezeichnungen erfolgen dabei in Form von Eingangsgröße/Ausgangsgröße e(i)/y(i). Die Wertigkeitszuordnungen für Eingangs- und Ausgangsgröße e(i) bzw. y(i) können aber insbesondere auch unabhängig voneinander und unabhängig von den Wertigkeitszuordnungen der Bearbeitungszustände sein.

Die in den Zustandsdiagrammen dargestellten Pfeile zur Beschreibung der möglichen Übergänge zwischen den Bearbeitungszuständen  $Z_2'$  bis  $Z_2$  und der entsprechenden Ausgangsgrößen

$y(i)$  bei bestimmten Eingangsgrößen  $e(i)$  dienen insbesondere zur Ableitung von Fuzzy-Folgerungen für das Fuzzy-Regelglied FAX. Auf der Grundlage dieser Fuzzy-Folgerungen wird die innere Zustandsgröße  $z(i)$  insbesondere durch die erste statische Fuzzy-Einrichtung  $F(z(i), e(i))$  und die Ausgangsgröße  $y(i)$  insbesondere durch die zweite statische Fuzzy-Einrichtung  $G(z(i), e(i))$  gemäß dem Zustandsdiagramm aktualisiert bzw. erzeugt, wie in Figur 7b bzw. 7c beispielhaft dargestellt ist. Beispielsweise sind zwei Fuzzy-Folgerungen:

10 WENN aktueller Bearbeitungszustand PS UND Eingangsgröße mit kleinem positivem Wert PS vorliegt, DANN sind folgender Bearbeitungszustand PM und Ausgangsgröße mittlerer positiver Wert PM.

15 In den beispielhaften Zustandsgraphen der Figuren 8 und 9 sind die Regeln, d.h. insbesondere die Fuzzy-Folgerungen, wiedergegeben, mit denen das Fuzzy-Regelglied FAX gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform aus der Eingangsgröße  $e(i)$  und aus dem Bearbeitungszustand  $Z2'$  bis  $Z2$  den Bearbeitungszustand  $Z2'$  bis  $Z2$  derartig aktualisiert und die Ausgangsgröße  $y(i)$  derartig erzeugt, daß das Fuzzy-Regelglied FAX zumindest eine integrierende bzw. eine differenzierende Übertragungscharakteristik aufweist.

25 Den hier dargestellten vorteilhaften Ausführungsformen liegt bei geeigneter Wahl der den Fuzzy-Folgerungen zugrundeliegenden Zugehörigkeitsfunktionen und der zugrundeliegenden Inferenzgröße zunächst nur eine lineare oder zumindest annähernd lineare Übertragungscharakteristik des Fuzzy-Regelglieds FAX zugrunde. Diese Übertragungscharakteristik bildet eine vorteilhafte Ausgangsbasis für Modifizierungen, beispielsweise 30 in Form von gezieltem Einbringen von Nichtlinearitäten.

Der in der Figur 8 dargestellte Zustandsgraph eines Fuzzy-Regelglieds FAX weist Regeln für Fuzzy-Folgerungen auf, welche eine integrierende Übertragungscharakteristik des Fuzzy-Regelglieds FAX bewirken. Vorteilhaft weisen dabei die Ausgangsgröße  $y(i)$  und die aktualisierte innere Zustandsgröße

$z(i+1)$ , d.h. der folgende Bearbeitungszustand  $Z2'$  bis  $Z2$  den gleichen Wert NM, NS, Z, PS oder PM auf.

- Beispielsweise bei Eingangsgrößen  $e(i)$ , welche annähernd den Wert Z aufweisen, verbleibt das Fuzzy-Regelglied FAX im vorherigen Bearbeitungszustand  $Z2'$  bis  $Z2$ . Bei kleinen positiven Werten PS der Eingangsgröße  $e(i)$  geht das Fuzzy-Regelglied FAX in den nächst höheren Bearbeitungszustand über, d.h. beispielsweise von PS nach PM. Bei kleinen negativen Werten NS der Eingangsgröße  $e(i)$  geht das Fuzzy-Regelglied FAX in den nächst niedrigeren Bearbeitungszustand über, d.h. beispielsweise von PS nach Z. Bei mittleren positiven Werten PM der Eingangsgröße  $e(i)$  geht das Fuzzy-Regelglied FAX insbesondere in den zweitnächst höheren Bearbeitungszustand über, d.h. beispielsweise von Z nach PM. Bei mittleren negativen Werten NM der Eingangsgröße  $e(i)$  geht das Fuzzy-Regelglied FAX insbesondere in den zweitnächst niedrigeren Bearbeitungszustand über, d.h. beispielsweise von Z nach NM.
- Der in der Figur 9 dargestellte Zustandsgraph eines Fuzzy-Regelglieds FAX weist Regeln für Fuzzy-Folgerungen auf, welche eine differenzierende Übertragungscharakteristik des Fuzzy-Regelglieds FAX bewirken. Vorteilhaft weist dabei der aktualisierte, d.h. folgende Bearbeitungszustand  $Z2'$  bis  $Z2$  den gleichen Wert NM bis PM wie die Eingangsgröße  $e(i)$  auf, so daß eine Speicherung der Eingangsgröße erfolgt. Die aktualisierte innere Zustandsgröße  $z(i+1)$ , d.h. insbesondere der folgende Bearbeitungszustand ist somit insbesondere nur von der Eingangsgröße  $e(i)$  abhängig, nicht aber vom aktuellen, d.h. derzeitigen Bearbeitungszustand  $Z2'$  bis  $Z2$ .

- Beispielsweise bei Eingangsgrößen  $e(i)$ , welche den Wert Z aufweisen, geht das Fuzzy-Regelglied FAX in den Bearbeitungszustand  $Z0$  über, dem die Wertigkeit Z zugeordnet ist. Die Ausgangsgröße  $y(i)$  ergibt sich aus der aktuellen Eingangsgröße  $e(i)$  und dem Wert der vorhergegangenen Eingangsgröße, d.h. dem aktuellen Bearbeitungszustand  $Z2'$  bis  $Z2$ . Beispielsweise

ergibt ausgehend vom aktuellen Bearbeitungszustand  $Z1'$ , dem der Wert NS zugeordnet ist, eine Eingangsgröße  $e(i)$  mit dem Wert  $Z$  den folgenden Bearbeitungszustand  $Z0$ , dem der Wert  $Z$  zugeordnet ist und eine Ausgangsgröße  $y(i)$  mit kleinem positivem Wert PS. Des weiteren sind im Beispiel der Figur 9 noch weitere Werte insbesondere für die Ausgangsgröße  $y(i)$  aufgeführt, wie beispielsweise PB und NB für große positive bzw. negative Werte und PH und NH für sehr große positive bzw. negative Werte.

10

Da die in den Figuren 8 und 9 dargestellten Beispiele Zustandsgraphen mit begrenzter Anzahl an Bearbeitungszuständen  $Z2'$  bis  $Z2$  beschreiben, liegt jeweils ein oberster Bearbeitungszustand  $Z2$  und ein unterster Bearbeitungszustand  $Z2'$  vor. Die durch das Fuzzy-Regelglied FAX einnehmbaren Bearbeitungszustände  $Z2'$  bis  $Z2$  und die Ausgangsgröße  $y(i)$  sind somit auf einen höchsten bzw. niedrigsten Wert, hier PM bzw. NM beschränkt. Dem Fuzzy-Regelglied FAX ist beispielsweise aber auch eine endlose oder halb offene Folge von Bearbeitungszuständen  $Zm'$  bis  $Zn$ , d.h. ohne Anzahlsbeschränkung zugrundeliegend.

20

In den Figuren 10 und 11 sind mit Bezug auf die in den Figuren 8 und 9 aufgeführten Ausführungsbeispiele der Erfindung mit integrierender bzw. differenzierender Übertragungscharakteristik jeweils ein Diagramm zur Darstellung der Eingangs- und Ausgangsgröße  $e(i)$  bzw.  $y(i)$  des entsprechenden zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds FAX beispielhaft dargestellt. Hierbei weist das jeweilige Fuzzy-Regelglied FAX zunächst eine nahezu lineare Übertragungscharakteristik auf. Diese nahezu lineare Übertragungscharakteristiken sind durch nachträgliches Einbringen von Nichtlinearitäten gezielt veränderbar, um ein erwünschtes Regelverhalten zu erzielen. Die dünnen durchgezogenen Kurven in den Figuren 10 und 11 stellen die entsprechende Eingangsgröße  $e(i)$  dar, welche hier beispielsweise einen sinusförmigen Verlauf aufweisen. Die fettgedruckten, durchgezogenen Kurven stellen die entsprechende

30

35



Ausgangsgröße  $y(i)$  dar, welche die Integral- bzw. Ableitungsfunktion der entsprechenden Eingangsgröße  $e(i)$  sind. Da das dynamische Fuzzy-Regelglied FAX gemäß der Erfindung zeitdiskret ist, weist die Ausgangsgröße  $y(i)$  einen stufenförmigen Verlauf auf. Die Größe der Stufen ist insbesondere durch die Abtastrate variierbar, d.h. die Taktrate, mit der das zeitdiskrete, dynamische Fuzzy-Regelglied FAX die innere Zustandsgröße  $z(i)$  aktualisiert.

10 In den Figuren 12a, 12b und 13 ist beispielhaft dargestellt, wie ein erfindungsgemäßer Regler RE durch das gezielte Einbringen von Nichtlinearitäten vorteilhaft modifizierbar ist. Das Abändern der Regeln, d.h. der Fuzzy-Folgerungen, kann insbesondere durch Abändern der Pfeile und der zugehörigen Ausgangsgröße  $y(i)$  im Zustandsgraphen erfolgen. Die Darstellungen der Figuren 12a, 12b und 13 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit unvollständig dargestellt, d.h. es sind insbesondere nicht alle Übergänge zwischen den Bearbeitungszuständen Z2' bis Z2 dargestellt und dienen lediglich zur Darstellung von Modifizier-Prinzipien, welche insbesondere auf die Ausführungsbeispiele der Figuren 8 und 9 übertragbar sind.

Die in den Figuren 12a und 12b dargestellten Ausführungsbeispiele betreffen die Zustandsgraphen zweier zeitdiskreter, dynamischer Fuzzy-Regelglieder FAX mit integrierender Übertragungscharakteristik, welche als sogenannte 'Anti-Wind-Up'-Regelglieder modifiziert sind. Die Fuzzy-Regelglieder FAX sind dabei auf eine endliche, d.h. begrenzte Anzahl an Bearbeitungszuständen, hier beispielsweise die fünf Bearbeitungszustände Z2' bis Z2 begrenzt, wodurch die äußeren Bearbeitungszustände Z2' und Z2 nicht unter- bzw. überschritten werden können. Das Fuzzy-Regelglied FAX verbleibt dabei im Beispiel der Figur 12a im höchsten Bearbeitungszustand PB, auch wenn als Eingangsgröße ein großer positiver Wert PB eingegeben wird, der sonst einen Sprung über drei Zustände bewirkt. Im Beispiel der Figur 12b wird sogar zusätzlich die beim Aktualisieren des Bearbeitungszustands bewirkte Sprungweite bei

Annäherung des Sättigungs-Bearbeitungszustands PB von Sprungweite drei, NB nach Z, über zwei, Z nach PM und eins, PM nach PB, zu null, PB nach PB, reduziert, obwohl als Eingangsgröße jeweils ein großer positiver Wert PB vorliegt.

5

Das in der Figur 13 dargestellte Ausführungsbeispiel betrifft den Zustandsgraphen eines zeitdiskreten, dynamischen Fuzzy-Regelglieds FAX, mit modifizierter, differenzierender Übertragungscharakteristik. Kleine positive und negative Werte PS bzw. NS der Eingangsgröße bewirken dabei zwar einen Übergang des Fuzzy-Regelglieds Fax vom Bearbeitungszustand Z in den entsprechenden folgenden Bearbeitungszustand, beispielsweise von Z nach PS, von Z nach NS oder umgekehrt, die Ausgabegröße ist jedoch für kleine Werte insbesondere auf den Wert Z, d.h. auf null reduziert. Dadurch wird insbesondere die Dämpfung von Rausch- und Störsignalen der Eingangsgröße bewirkt.

10

15

## Patentansprüche

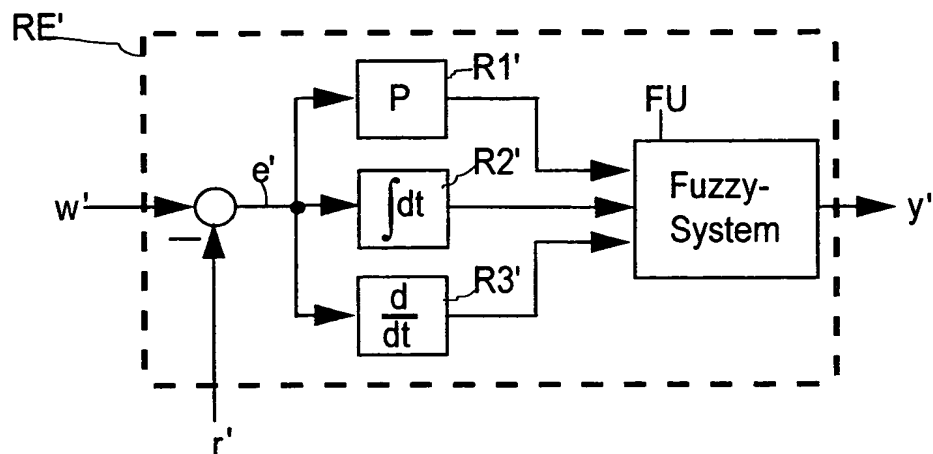
1. Regler (RE) mit wenigstens einem Regelglied (FA1..FA8), insbesondere mit zumindest einer integrierenden (FA6, FA8) und/oder differenzierenden (FA7) Übertragungscharakteristik, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß das Regelglied (FA1..FA8) als ein zeitdiskretes, dynamisches Fuzzy-Regelglied (FAX) aufgebaut ist und daß das Fuzzy-Regelglied (FAX) eine Speichereinrichtung (MZ) zur Zwischenspeicherung einer aktuellen inneren Zustandsgröße ( $z(i)$ ) aufweist.
2. Regler (RE) nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß das Fuzzy-Regelglied (FAX, FA1..FA8) aus einer Eingangsgröße ( $e(i)$ ) und aus einer inneren Zustandsgröße ( $z(i)$ ) auf der Grundlage von Fuzzy-Folgerungen ( $F1, I1, D1, F2, I2, D2$ ) die innere Zustandsgröße ( $z(i)$ ) derartig aktualisiert ( $z(i+1), F(z(i), e(i))$ ) und eine Ausgangsgröße ( $y(i)$ ) derartig erzeugt ( $G(z(i), e(i))$ ), daß das Fuzzy-Regelglied (FAX) zumindest eine integrierende und/ oder eine differenzierende, insbesondere nichtlineare Übertragungscharakteristik ( $e(i), y(i)$ ) aufweist (FIG 7a).
3. Regler (RE) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß das Fuzzy-Regelglied (FAX) wenigstens eine erste statische Fuzzyeinrichtung ( $F(z(i), e(i))$ ) zur Aktualisierung der inneren Zustandsgröße ( $z(i)$ ) des Fuzzy-Regelglieds (FAX) auf der Grundlage von Fuzzy-Folgerungen aufweist (FIG 7b).
4. Regler (RE) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß das Fuzzy-Regelglied (FAX) wenigstens eine zweite statische Fuzzyeinrichtung ( $G(z(i), e(i))$ ) zur Erzeugung der Ausgangsgröße ( $y(i)$ ) des Fuzzy-Regelglieds (FAX) auf der Grundlage von Fuzzy-Folgerungen aufweist (FIG 7c).

5. Regler (RE) nach einem der Ansprüche 1 bis 4,  
dadurch gekennzeichnet,  
daß

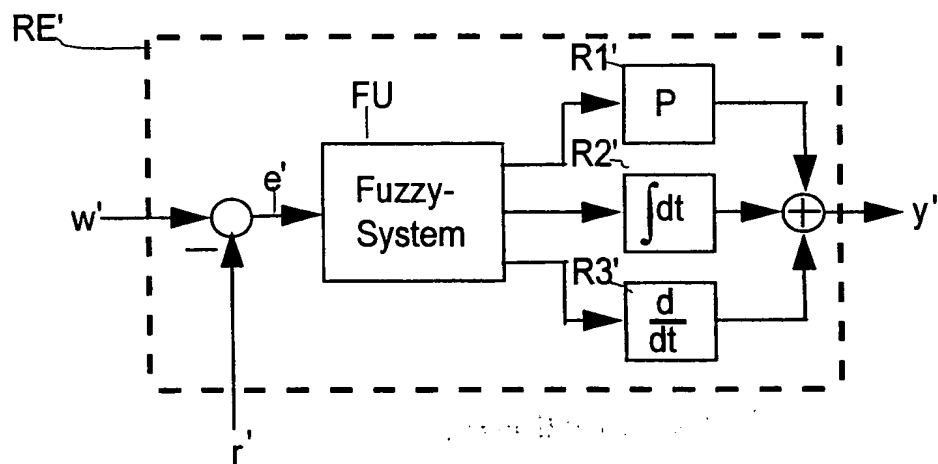
- 5 a) die innere Zustandsgröße ( $z(i)$ ) des Fuzzy-Regelglieds (FAX) durch wenigstens eine Folge von Bearbeitungszuständen ( $Zm'..Zl'$ ,  $Z0$ ,  $Z1..Zn$ ) gebildet wird, und
- b) das Fuzzy-Regelglied (FAX) bei einer Aktualisierung der inneren Zustandsgröße ( $z(i)$ ) von einem bisherigen Bearbeitungszustand ( $Zm'..Zn$ ) zeitdiskret in einen folgenden  
10 Bearbeitungszustand ( $Zm'..Zn$ ) übergeht (FIG 8, FIG 9).

6. Verwendung eines Reglers (RE) nach einem der vorangegangenen Ansprüche zur Regelung eines technischen Prozesses.

1/6



**FIG 1**  
(Stand der Technik)



**FIG 2**  
(Stand der Technik)

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

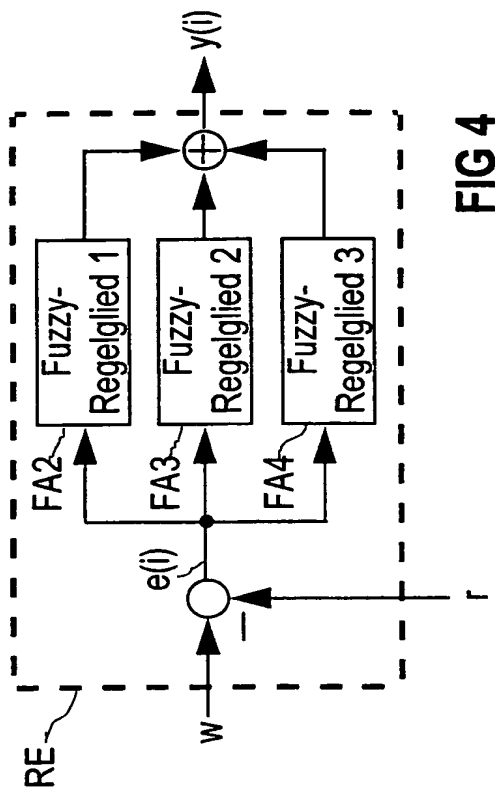


FIG 4

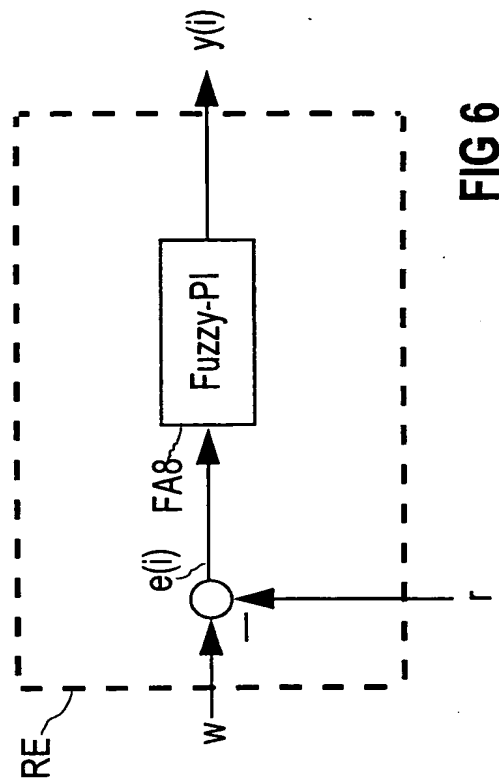


FIG 6

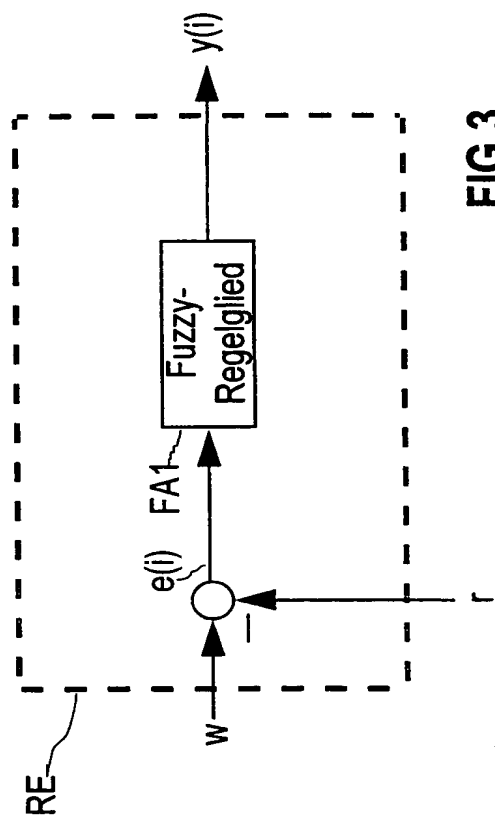


FIG 3

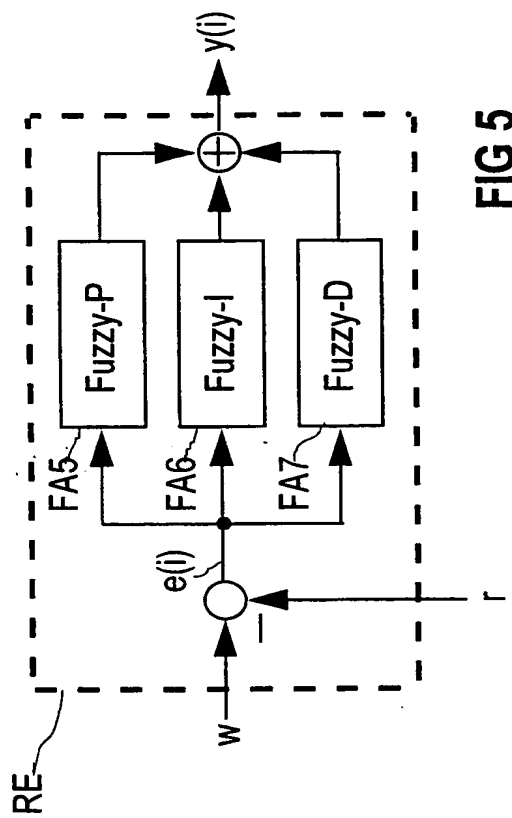
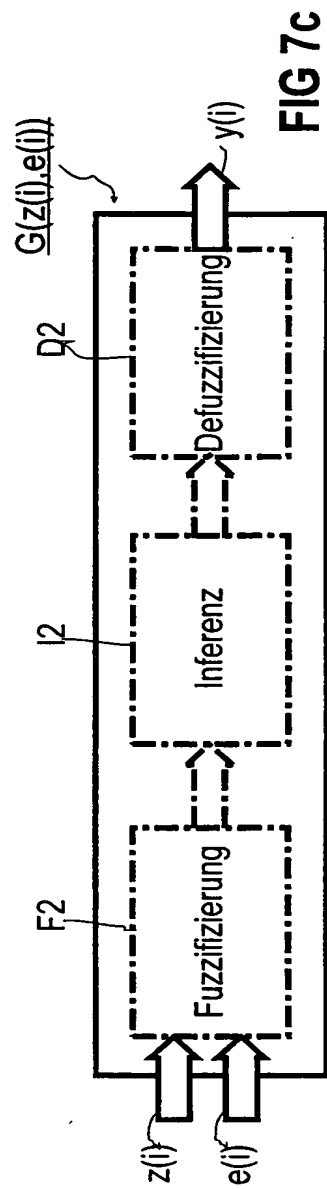
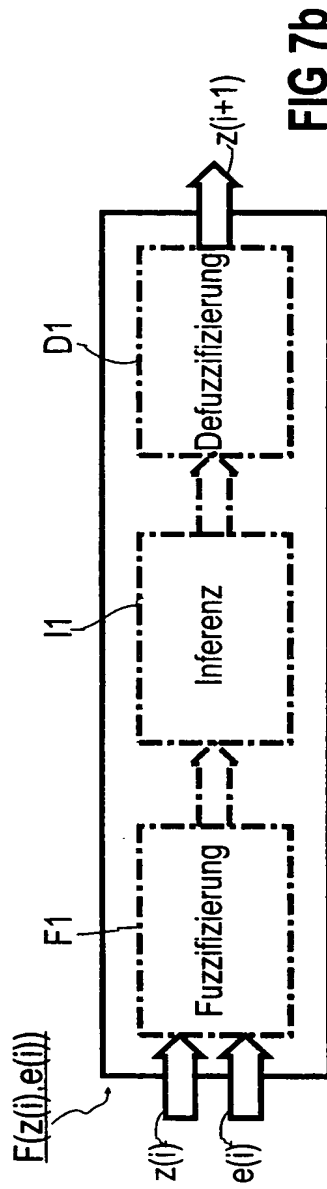
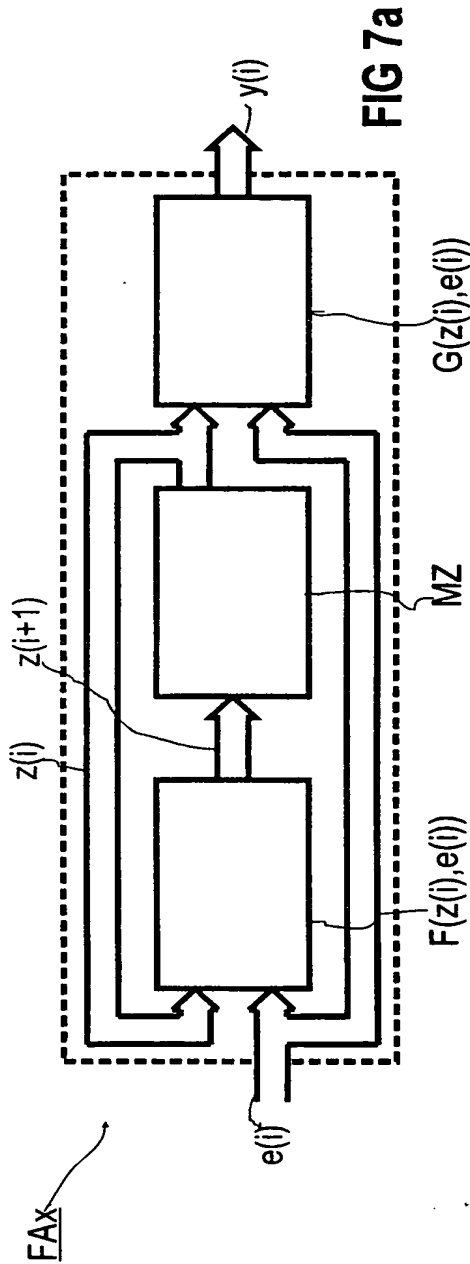


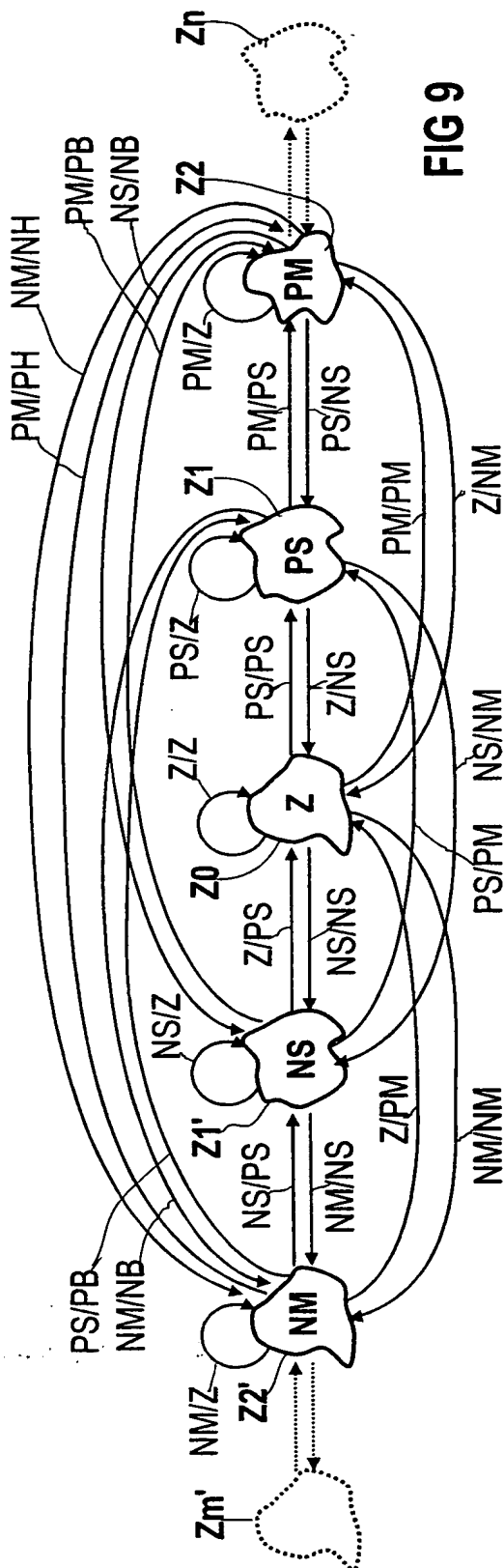
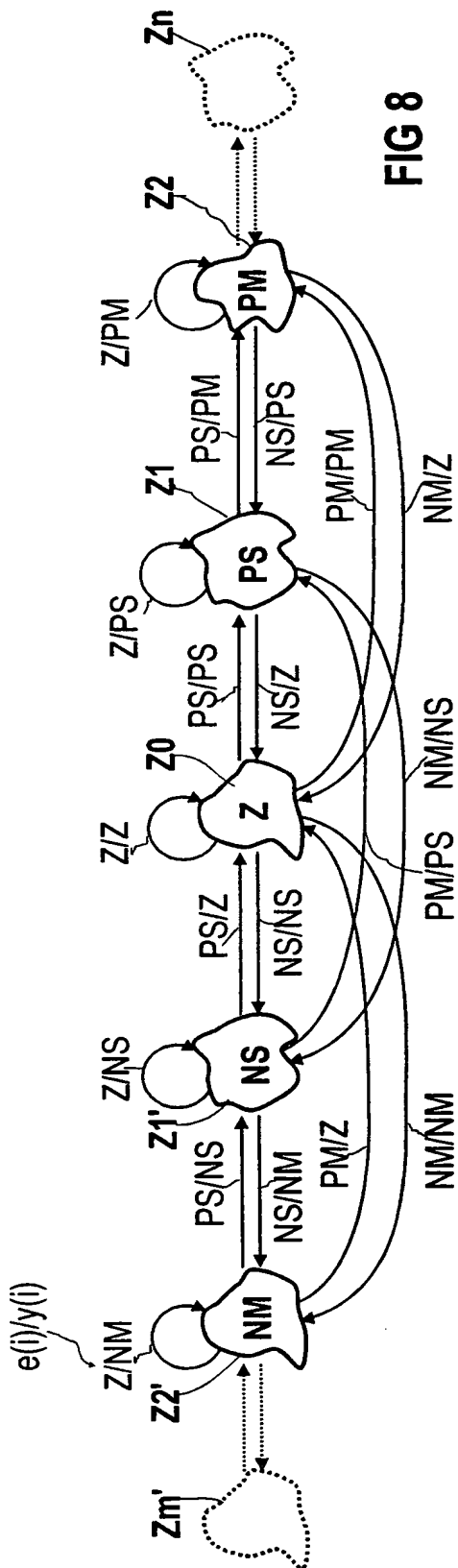
FIG 5

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**





**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

5/6

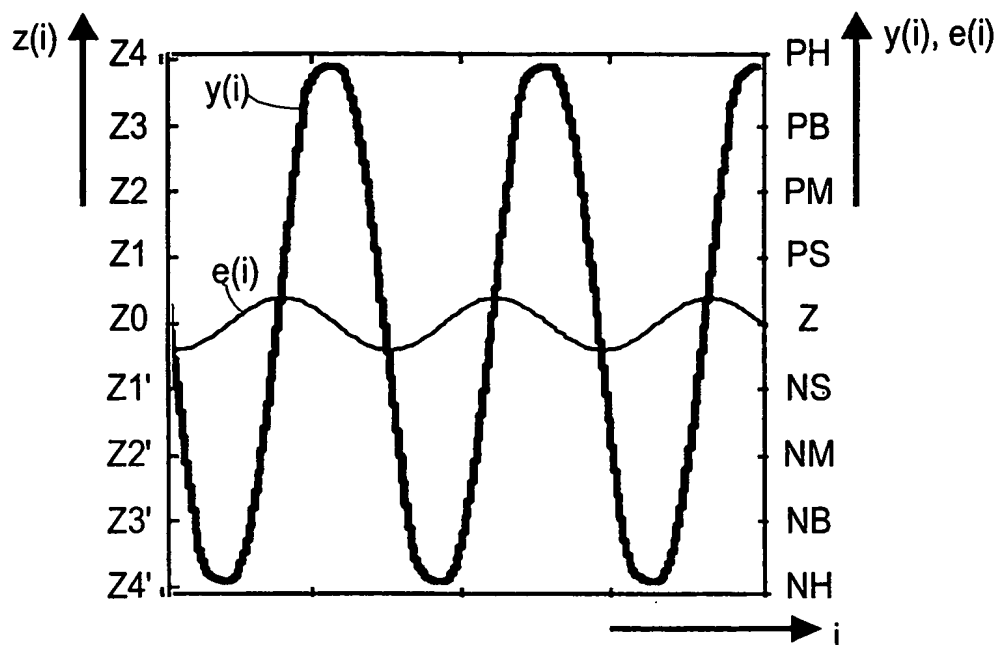


FIG 10

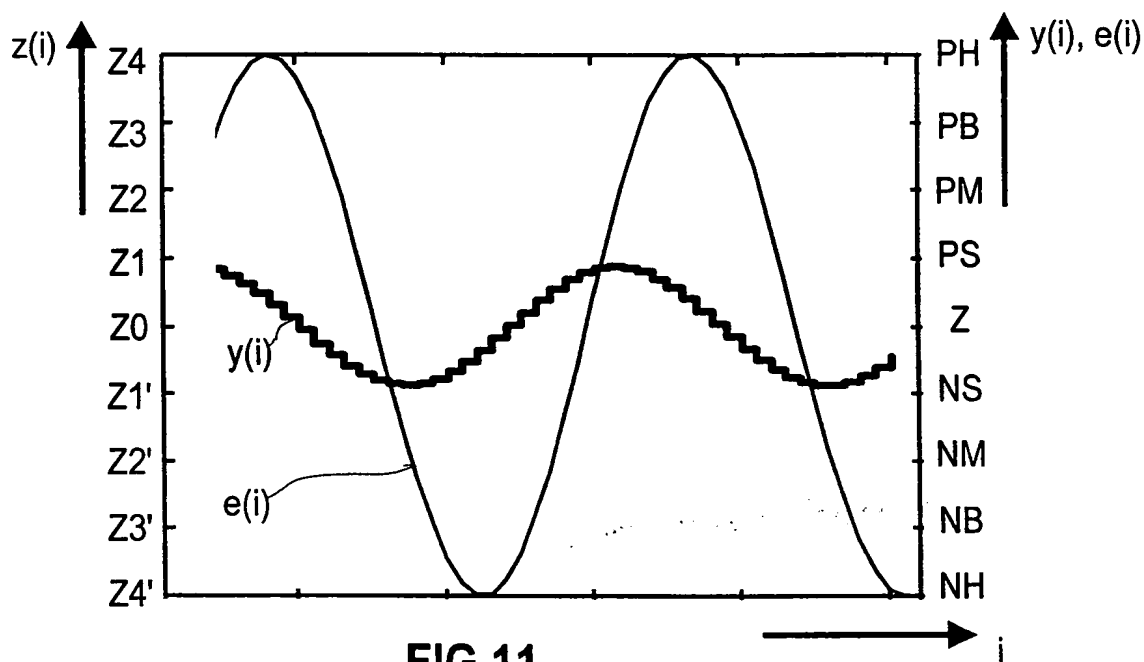
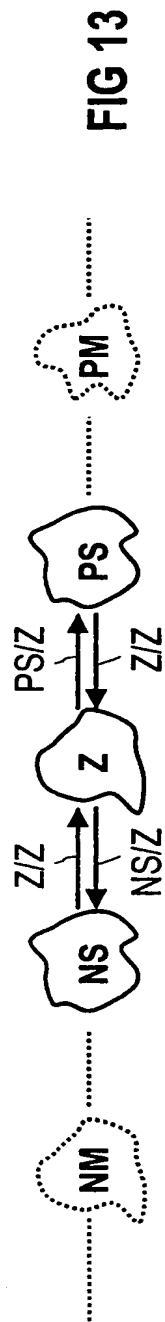
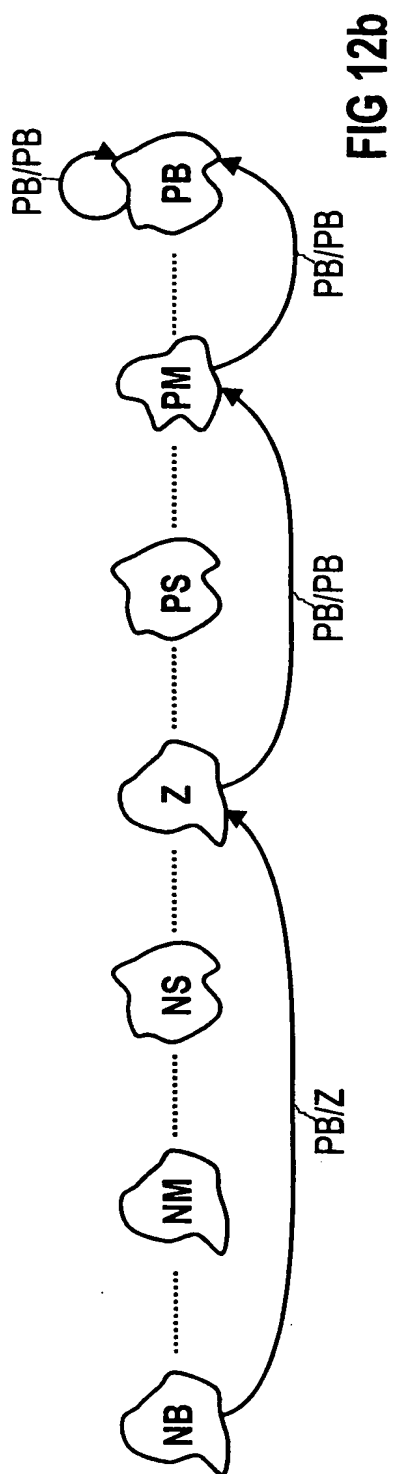
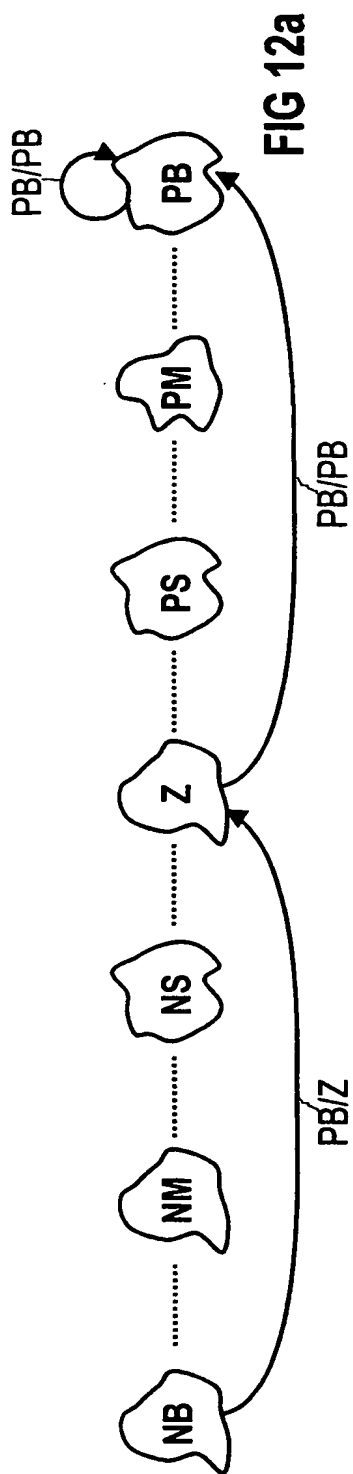


FIG 11

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**